

## İNCE KOMPOZİT LEVHALARDA ANİZOTROP TERMAL GERİLME ANALİZİ

Tuğba Baytak<sup>1</sup>, Osman Bulut<sup>1</sup>, Çağrı Mollamahmutoğlu<sup>2</sup>, Abdullah Dönmez<sup>1</sup>, Şenol Ataoğlu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

<sup>2</sup> İnşaat Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

### ABSTRACT

In this work, the distribution of the thermal stress around the interface of the composite bimetal plates under the anisotropic effect of thermal change has been analyzed. Furthermore, the state of stress concentration near the defects modeled on one of the plates has been investigated. The stress analyses have been performed by the method of mechanical modeling of photoelasticity on the model which exhibits the bending behavior under the mentioned effect. The developed model of the composite was produced by a glass and an Araldite plates whose dimensions are the same. The elastic strains have been mechanically modeled which are equivalent to the thermal effects in the plane of the plate different in two perpendicular directions. Moreover, the stress distribution has been obtained around the cavities formed on this plate.

### ÖZET

Bu çalışmada, iki farklı malzemeden imal edilmiş kompozit levhaların doğrultuya bağımlı sıcaklık değişimi etkisi altında, birleşim yüzeyi civarında termal gerilme dağılımı incelenmiştir. Bu bölgede ayrıca levhalardan birinde modellenen kusurlar civarında gerilme hali ve gerilme yığılması incelenmiştir. Bahsedilen etki ile eğilme davranışı gösteren modelde gerilme analizi fotoelastisitenin mekanik modelleme yöntemi ile yapılmıştır. Geliştirilen modelde cam levha ile bununla aynı boyutlardaki Araldit levha birleşimi imal edilmiştir. Araldit levhanın düzlemi içerisindeki birbirine dik iki eksen doğrultusunda iki farklı sıcaklık etkisine eşdeğer elastik şekil değiştirmeler mekanik olarak modellenmiştir. Ayrıca bu levhada açılan oyuklar civarında gerilme dağılımı elde edilmiştir.

### GİRİŞ

Endüstride yaygın olarak kullanılan basınç kapları ve kazanlar yüksek derecede sıcaklık değişimine maruz kalmaktadır. Özellikle ekonomik etkiler düşünüldüğünde malzemeler, farklı katmanların birleşimi şeklinde oluşturulabilmektedir ve bu birleşim yüzeylerinde ve civarlarında farklı şekillerde oyuk ve çatlaklar meydana geldiği gözlenmektedir [1,2].

Bu çalışmada, birlikte çalışan iki farklı malzemeden imal edilmiş kompozit levhaların doğrultuya bağımlı sıcaklık değişimi etkisi altında, birleşim yüzeyi civarında termal gerilme dağılımı incelenmiştir. Bu bölgede ayrıca levhalardan birinde modellenen kusurlar civarında gerilme yığılması hali incelenmiştir. Bahsedilen etki ile eğilme davranışı gösteren modelde gerilme analizi fotoelastisitenin mekanik modelleme yöntemi ile yapılmıştır [3,4]. Bir cismin sıcaklığı değiştirildiğinde o cismin şekil değiştirmeleri her doğrultuda

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (1)$$

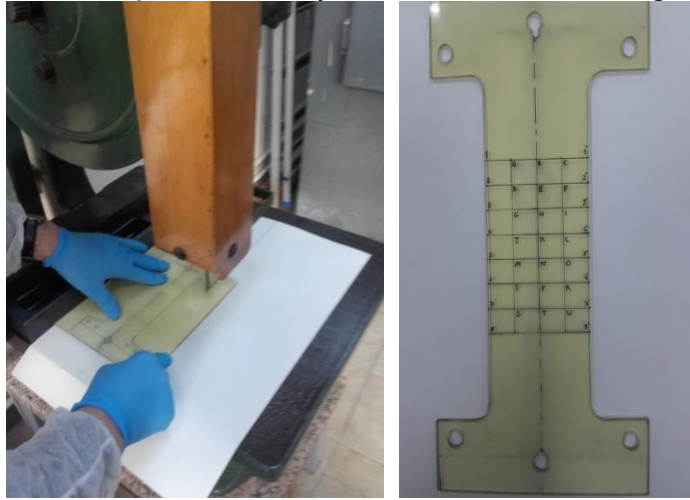
şeklinde ifade edilir. Burada  $\alpha$  ısı genleşme katsayısını,  $\Delta T$  sıcaklık değişimini ve  $\varepsilon$  boyca birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. İki farklı malzemeden oluşturulmuş bir kompozitte, sıcaklık değişiminin bu iki malzeme için aynı olmaması durumunda malzemeler arası şekil değiştirme farkının mutlak değeri

$$|\Delta \varepsilon| = |\alpha_1 - \alpha_2| \cdot |\Delta T_1 - \Delta T_2| \quad (2)$$

şeklindedir. Bu çalışmada  $\Delta T_2$  sıcaklık değişiminin sıfır olması ve  $\Delta T_1$  'in doğrultudan bağımsız olmaması durumu ele alınmıştır.  $\Delta T_1$  termal değişiminin anizotrop olması durumunda iki levhadan oluşturulmuş tabakalı kompozit levha problemi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Model Araldit ve cam levhadan ile imal edilmiştir. Sıcaklık etkisinin yalnızca Araldit levhada bulunduğu durum düşünülmüştür. Bunun için (2) denkleminde ifade edilen şekil değiştirme Araldit levhada mekanik olarak modellenip fotoelastisitenin şekil değiştirmelerin dondurulması yöntemi ile sabitlenmiştir [5, 6]. Ayrıca Araldit levhada gerilme konsantratorü olması için mekanik yöntemlerle kusurlar oluşturulmuş ve gerilme dağılımı incelenmiştir.

### DENEY ÇALIŞMALARI

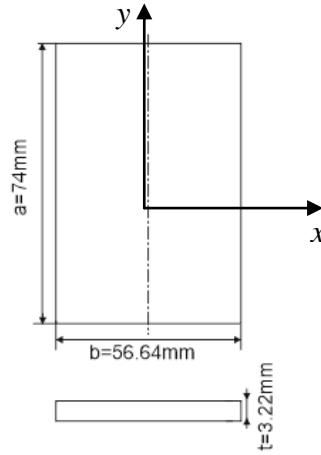
Termal etkiye maruz parçanın imali için kullanılacak numuneyi hazırlamak üzere fotoelastik incelemeye uygun olarak üretilmiş Araldit plakadan Şekil 1 'deki gibi kesim yapıldıktan sonra şekil değiştirmelerin hassas ölçülmesi amacıyla numune üzerinde bir ağ oluşturulmuştur.



Şekil 1. Deney numunesi kesim işlemi ve ağ oluşturulması

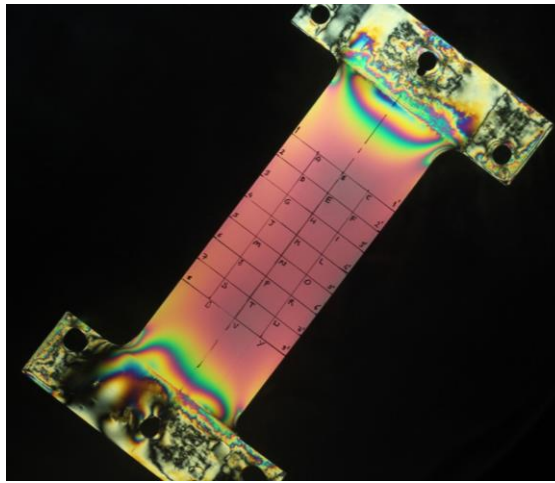
Yükleme öncesi ağ üzerinde  $x$  doğrultusundaki çizgiler boyunca uzunluk ölçümleri ve kesişim noktalarında kalınlık ölçümleri Mitutoyo marka mikrometre ile 5'er kez yapıp ortalamaları alınmıştır (Şekil 2). Bu ölçümlerle Şekil 2' de verilen yükleme öncesi kullanılacak  $b$  genişlik,  $t$  kalınlık ve  $a$  yükseklik olmak üzere numune boyutları elde edilmiştir.

İlgili numunede termal etki, mekanik yolla modellenerek, oluşan şekil değiştirmeler dondurulmuştur [5, 6]. Burada amaç, malzemenin lineer elastiklik sınırı içerisinde kalarak,  $\varepsilon = \alpha \Delta T$  şekil değiştirmesinin mekanik yolla numunede oluşturulması ve bunun sabitlenmesidir. Fotoelastisitenin mekanik modelleme yönteminde elde edilen numunenin, yukarıda hesaplanmış elastisite modülü ve sıcaklık farkından dolayı termal genleşme yaparak  $\varepsilon = \alpha \Delta T$  kadar şekil değiştiren aynı boyutlardaki bir levhanın modeli olduğu düşünülmektedir [7].



Şekil 2. Araldit levhada termal etkinin mekanik modellenmesi için imal edilen numunenin görünüşü ve modelde kullanılacak kısmının boyutları

Deney düzeneği fotoelastik incelemeye uygun fırına kurularak numune yüklenmiştir. Malzeme oda sıcaklığında lineer-elastik davrandığı gibi belirli bir sıcaklık değerinde de lineer-elastik olarak davranmaktadır. Malzemenin camlaşma geçiş sıcaklığı  $T_g$ , DMA Q800 (Dynamic Mechanical Analyzer) ile  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak bulunmuştur. Malzemenin yukarıda bahsedilen lineer-elastik davrandığı sıcaklık değeri, belirlenen  $T_g$  sıcaklık değerinden daha yüksektir ve yapılan deneyler sırasında bu sıcaklık değeri  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada uygulanan şekil değiştirmelerin dondurulması yönteminde amaç, optik anizotrop özellikteki malzemede, belirlenen sıcaklıkta numunede oluşturulan şekil değiştirmeleri oda sıcaklığında kalıcı kılmaktır. Bu amaçla, numune sıcaklığı saatte  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  artacak şekilde belirlenen kritik sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Böylece model sıcaklığının homojen olması sağlanmıştır. Numuneye kritik sıcaklıkta toplam  $46.73\text{ N}$  eksenel çekme yükü uygulanmıştır. Sıcaklık farkından dolayı oluşacak ek gerilmeleri önlemek için  $5\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$  ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. Şekil 3'de interferans şeritleri dondurulmuş numunenin polariskopta çekilmiş fotoğrafı görülmektedir. Geometrisi Şekil 2 'de verilen şekil değiştirmelerin dondurulduğu levha, bu numunenin orta kısmından kesilerek elde edilmiştir. Bu levhada hassas kesimle Şekil 4'deki gibi oyuklar oluşturulmuştur. Bunun için CNC tezgah kullanılmıştır. Oluşturulan merkezdeki oyuk çapı  $3\text{ mm}$  olup, yatay ve düşeydeki oyuk uzunlukları da  $3\text{ 'er mm}$  ve her bir oyuk ucu eğrilik yarıçapı  $1\text{ mm}$  'dir.



Şekil 3. Eksenel çekme şekil değiştirmelerinin dondurulduğu numunenin polariskopta çekilmiş fotoğrafı

Yapılan deney sonrası numunede ağ üzerindeki uzunluklar deney öncesinde olduğu gibi kumpas yardımıyla hassas ölçümle, tekrar ölçülerek malzemenin dağılımının uniform olduğu bölgede şekil değiştirmesi hesaplanmıştır. Bu değer

$$\varepsilon_x = -0.01212$$

olarak ölçülmüştür. Ölçümün yapıldığı  $x$  doğrultusu şekil 2 'de görülmektedir. Yüklemin yapıldığı sıcaklıkta malzemenin Poisson oranı 0.49 'dur. Böylece yükleme doğrultusundaki şekil değiştirme

$$\varepsilon_y = -(-0.01212 \cdot 0.49) \approx 0.0242$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak elastisite modülü ( $E$ ) ve optik hassasiyet katsayısı ( $\sigma_0^{1.0}$ ) bulunacaktır.

Numuneye eksenel olarak uygulanan toplam yük  $P=46.73N$  ve kesit boyutları  $b(\text{genişlik})=56.64mm$ ,  $t(\text{kalınlık})=3.22 mm$  olduğundan keside gelen gerilme (Şekil 2)

$$\sigma = \frac{P}{A} = 0.256 \frac{N}{mm^2} \quad (3)$$

olarak hesaplanır.

Tek eksenli yükleme durumunda lineer-elastik bu malzeme için Hooke Kanunu

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

kullanılarak elastisite modülü

$$E = 10.59 MPa$$

olarak hesaplanmıştır.

Optik hassasiyet katsayısının bulunması amacıyla

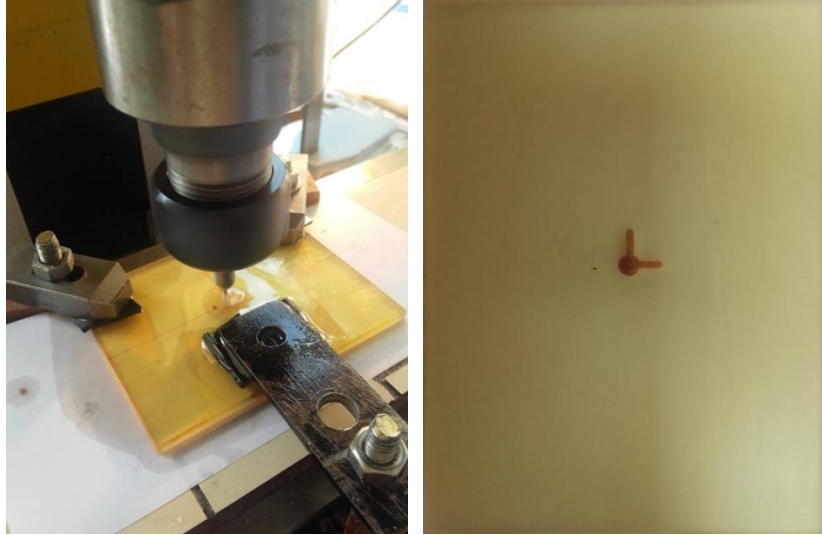
$$\sigma = \left(\frac{m}{t}\right) \sigma_0^{1.0} \quad (5)$$

bağıntısı kullanılacaktır [3, 4]. Burada  $\sigma$ , ölçüm yapılan noktadaki gerilme,  $\sigma_0^{1.0}$ , optik hassasiyet katsayısı ve  $t$  ise bu noktadaki ölçüm sırasında ışığın geçtiği kalınlıktır. Gerilme değeri bilinen numunenin orta kısmında  $m$ (şerit sayısı) mikroskopta yapılan ölçümler sonucu 3.32 olarak bulunmuştur. Bunun sonucunda

$$\sigma_0^{1.0} = 0.248 \frac{N}{mm.\text{şerit}} \quad (6)$$

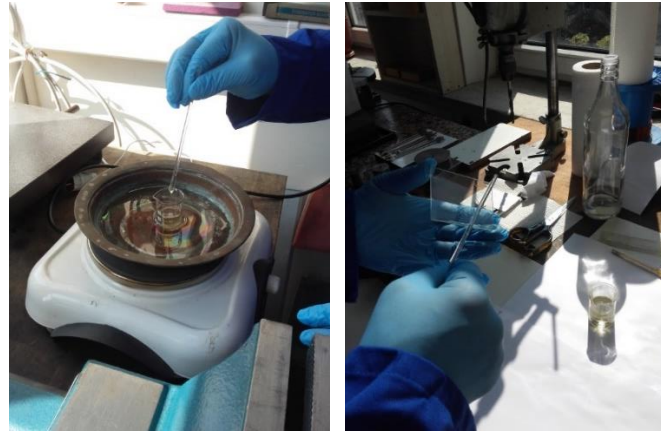
olarak bulunmuştur.

İkinci levha malzemesi olarak cam seçilmiştir. Bu tercihin sebebi, camın, saydam olması ve optik hassasiyetinin düşük olması nedeni ile fotoelastik incelemeye uygun olmasıdır. Cam levha, 1 mm kalınlığında ve diğer boyutları şekil değiştirmelerin dondurulduğu levha ile aynı olacak şekilde hazırlanmıştır.

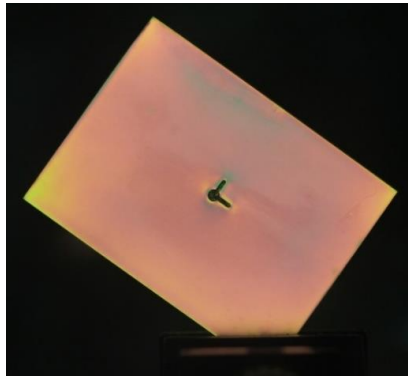


Şekil 4. Şekil değiştirmelerin dondurulduğu Araldit levhada oyuk oluşturulması

Kompozit modelin oluşturulması için termal şekil değiştirmelerin dondurulduğu levha, yüksüz cam levha ile yapıştırılmıştır. Malzemenin kompozit olarak çalışabilmesi için iki malzemenin yapıştırılma işlemi çok önemlidir. Bu çalışmada yapıştırıcı olarak Araldit (epoksi yapıştırıcı), kullanılmıştır. Yapıştırıcının hazırlanması amacıyla sıvı Araldite %30 oranında sertleştirici katılmıştır. İki malzemenin de yüzeyi iyice temizlendikten sonra akıcı kıvama gelen karışım bir çubuk yardımıyla çok ince bir şekilde iki malzemenin de yüzeyine sürülmüştür. Oyuk açılan levhada yapıştırma işleminden önce oyuk içerisinde yapıştırıcı birikmemesi için daha sonra temizlenmek üzere oyuklar mum ile doldurulmuştur. Yapıştırma işleminden bazı adımlar şekil 5 'de görülmektedir.



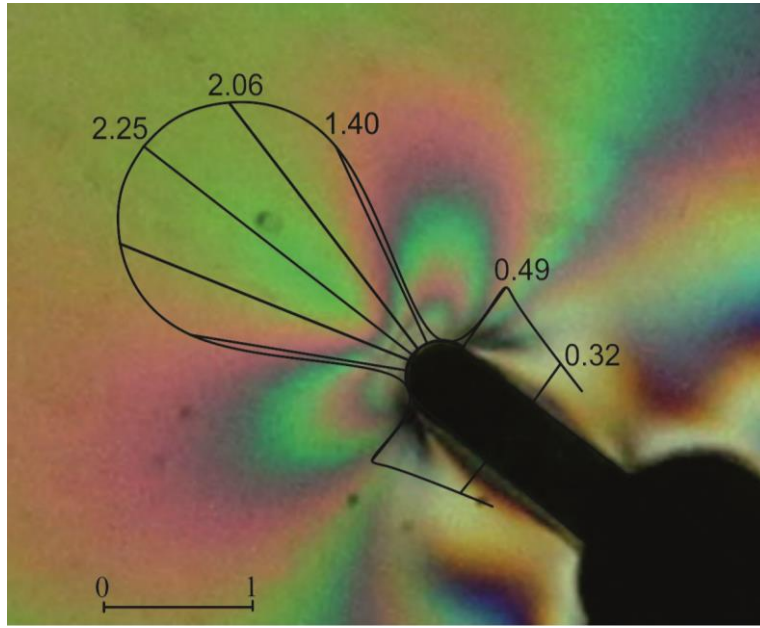
Şekil 5. Yapıştırıcının kıvamının oluşturulması ve malzemelere sürülmesi işlemi



Şekil 6. Cam levha ile yapıştırılmış numunede ısıtma öncesi dondurulmuş şekil değiştirmelerin polarimetrik fotoğrafı

Yapışmanın tam olarak sağlanabilmesi için bir düzeneğe ile levhaların birleşim düzlemine 0.2 MPa sabit basınç yükü 24 saat süresince uygulanmıştır. Yapıştırıcının polimerize olması amacıyla model, fırında 40 °C'ye kadar ısıtılıp 24 saat bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Şekil 6 'da bu işlemlerden sonra modelin polariskoptaki fotosu görülmektedir. Bu şekilde dondurulmuş şekil değiştirmeler henüz serbestleştirilmediğinden Araldit levhadaki homojen gerilme dağılımı görülmektedir.

Bundan sonra model, daha önce belirlenmiş kritik sıcaklık olan 100 °C'ye kadar saatte 5 °C artacak şekilde yavaş yavaş ısıtılmıştır. Birleştirilmiş numune ısıtılınca şekil değiştirmeler serbestleşmiş, fakat levhalar arası etkileşim sonucunda yeni bir gerilme dağılımı oluşmuştur. Ardından numune belirtilen rejimle soğutularak şekil değiştirmeler dondurulmuştur. Bunun sonucunda oyuk ucunda boyutsuz gerilme dağılımını gösteren polarimetrik fotoğraf şekil 7 'de verilmiştir.



Şekil 7. Modelde elde edilen boyutsuz gerilme dağılımına ait polarimetrik fotoğraf

Deney sonrası modelde sürekliliğin bozulmadığı oyuğun tepe noktasında, Leica DM 4500 P polarize mikroskopta Berek kompansatörü ile ölçümler yapılarak şerit sayısı ( $m$ ) 7.427 olarak bulunmuştur. (6) denklemindeki  $\sigma_0^{1.0}$  katsayısı ve bu noktada ışığın geçtiği kalınlık olan  $t=3.217$  mm değerleri (5) bağıntısında kullanılarak asal gerilmelerin farkının mutlak değeri

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = \sigma_\theta = 0.572 \text{ MPa} \quad (7)$$

olarak bulunmuştur. Burada ilgili oyuğun uç noktasında sınır şartlarından dolayı gerilmenin radyal bileşeni sıfır olacağından, elde edilen gerilme değeri aslında teğet doğrultusundaki gerilmenin bileşenini vermektedir.

### DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu çalışmada ele alınan türdeki problemle uygulamada sıcaklık etkisine maruz çeşitli yapılarda karşılaşılmaktadır. Bu tür yapılara örnek olarak sıcaklık değişimine maruz endüstriyel yapılar veya gece- gündüz sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerdeki yapılar gösterilebilir. Bahsedilen yapılarda değişik etkilerle oluşabilen kusurların civarlarında gerilme yığılmalarının oluşması sonucu yapının güvenliği tehlikeye girmektedir. Bu çalışmada, bu tür yapılarda kompozit elemanlardaki kusurlar civarında doğrultudan bağımsız olmayan termal etkinin oluşturduğu gerilme analizi yapılmıştır. Yapı boyutlarının kusur boyutlarına göre çok



büyük olmasından dolayı oluşturulan model dikdörtgen Araldit ve cam levhaların birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Deneyde termal etki mekanik olarak modellenmiş ve şekil değiştirmelerin dondurulması yöntemiyle modelde sabitlenmiştir.

Model oluşturulurken iki levha birbirine epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı, üçüncü bir faz oluşturmaması için, çok ince olacak şekilde yüzeylere uygulanmıştır. Bundan dolayı modelde levhalar arası gerilme aktarımı ihmal edilen mertebede hata ile gerçekleştirilmiştir.

Termal etkinin modellendiği levhanın elde edilmesi amacıyla aksenal çekme yüküne maruz çubuk kullanılmıştır. Çekme doğrultusunda oluşan şekil değiştirmenin buna dik doğrultudaki şekil değiştirmeye oranı, mesnetlerden yeteri uzaklıkta Poisson oranının ters işaretlisine eşittir. Dolayısıyla bu çubuktan elde edilen levhada dondurulmuş şekil değiştirme iki dik doğrultuda birbirinden farklıdır. Malzemenin belirlenen kritik sıcaklıktaki Poisson oranı 0.49 olduğundan çekme doğrultusundaki şekil değiştirmenin diğer doğrultudaki şekil değiştirmeye oranı yaklaşık 2 ' dir.

Sıcaklık değişimi sırasında malzemelerin sıcaklık genleşme katsayılarının farklı olması sonucu levhalar eğilmeye çalışmıştır. Cam gevrek bir malzeme olduğundan Araldit levhadaki şekil değiştirmelerin serbest bırakılmasıyla cam levhanın üzerinde yer yer çatlaklar oluşmuştur. Kırılmaların gerilme dağılımını etkilemediği oyuk civarında ölçümler yapılmıştır. Bahsedilen oyuk ucunda elde edilen asal gerilme değeri, önceden levhada sabitlenmiş gerilme değeri ile kıyaslandığında 2.25 katı büyük olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Z. Abdulaliyev, S. Ataoglu, O. Bulut, ve E.S. Kayali, *Three-dimensional stress state around corrosive cavities on pressure vessels*, J Press Vess Tech-T ASME, 132(2),021204, 2010.
- [2] T.C. Nguyen, D.C. Weckman, D.A. Johnson, *The discontinuous weld bead defect in high-speed gas metal arc welds*, Weld J, 86, 360s-372s, 2007.
- [3] M.M. Frocht, *Photoelasticity*, Wiley, New York, 1947.
- [4] A.J. Durelli, E.A. Phillips, and C.H. Tsao, *Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain*, Mc.Graw-Hill, New York, 1958.
- [5] M.A. Schroedl, J. J. McGowan, C.W. Smith, An assessment of factors influencing data obtained by the photoelastic stress freezing technique for stress fields near crack tips, *Engineering Fracture Mechanics*, 1972, 4, 4, 801-809.
- [6] T. Slot, Photoelastic Simulation of Thermal Stresses by Mechanical Prestraining, *Experimental Mechanics*, Vol. 5, No. 9, 1965, pp. 273–282.
- [7] M. Bakioglu, Z. Abdulaliyev, O. Bulut, S. Ataoglu, Thermal Stress Intensity Factor in Plane Problems: *9th International Fracture Conference*, YTU, Istanbul, 2011.